

基于 Daycent 模型的张掖地区天然草地土壤有机碳储量研究

杨敏聪¹, 徐玉娟², 张美玲^{1*}, 王鑫婧¹, 黄山枫², 高志文²

(1. 甘肃农业大学理学院, 数量生物学研究中心, 甘肃 兰州 730070; 2. 环保桥(上海)环境技术有限公司, 上海 200120)

摘要:【目的】以张掖天然草地土壤有机碳储量为研究对象, 将 Daycent 模型参数本地化, 使其适用于张掖地区天然草地土壤有机碳储量的模拟, 从而研究张掖地区天然草地土壤有机碳储量空间分布和影响因素。【方法】利用 CENTURY 模型的每日时间步长版本 Daycent 模型, 根据张掖地区气象站点的日值气象数据、土壤数据和 2022 年 6—7 月实测数据, 模拟 1979—2020 年张掖地区天然草地土壤有机碳储量空间分布, 并分析其影响因素。【结果】张掖地区天然草地土壤有机碳储量呈现“东西高, 中间低”的空间分布格局, 总土壤有机碳储量与慢性土壤有机碳储量的变化趋势基本一致; 其中 2022 年 6 月天然草地土壤有机碳储量在肃南裕固族自治县最高, 为 36.181 kg/m², 土壤有机碳储量在山丹县最低, 为 4.661 kg/m²。从影响因素来看, 海拔与天然草地土壤有机碳储量分布一致; 土壤理化性质与天然草地土壤有机碳储量之间的相关性较低; 降水量与天然草地土壤有机碳储量之间呈现正相关, 温度与天然草地土壤有机碳储量之间呈现负相关。【结论】DAYCENT 模型可以有效地模拟张掖天然草地土壤有机碳储量, 模型的适应性很强, 张掖地区天然草地土壤有机碳储量受诸多因素影响, 慢性土壤有机碳库含量对张掖天然草地土壤碳储量的影响最大。研究对张掖地区天然草地碳汇管理具有一定的指导意义。

关键词: 张掖地区; 土壤有机碳; 储量; Daycent 模型; 空间分布; 影响因素

中图分类号: S812 **文献标志码:** A **文章编号:** 1009-5500(2024)04-0034-10

DOI: 10.13817/j.cnki.cycp.2024.04.005



土壤是连接大气圈、水圈、生物圈和岩石圈的重要纽带, 是控制全球碳循环动态的重要组成部分^[1]。不合理的土地利用不仅会破坏土壤与大气之间的碳循环平衡, 而且导致土壤中大量的有机碳被氧化并以 CO₂ 的形式释放到大气中, 从而增加了温室气体排

放^[2]。草地是陆地生态系统的重要组成部分, 是重要的碳汇之一^[3-4], 草地不仅发挥着生物多样性保护、水源涵养、水土保持等多种生态系统服务功能, 而且在固碳和调节气候中具有不可忽视的作用^[5-6]。

我国草地碳储量研究始于 20 世纪 90 年代中期, 由于地上和地下生物量比值、碳含量因子、土壤厚度和分层方法等因草地类型而异, 从而导致估算结果存在较大差异和不确定性^[7-9]。如在谢立军等^[9]的研究中, 样地勘测法对土壤有机碳的核算会因不同植被统计的不完整、实地测量数据的匮乏、土壤的空间异质性等因素而影响最终的研究结果。国内外对草地碳储量的研究方法主要有实地勘测法、遥感法、模型法等^[9]。实地勘测法因试验方法的不同而导致结果差异较大, 如样品采集方式的不同、测量中使用不同种类

收稿日期: 2023-03-13; **修回日期:** 2023-03-30

基金资助: 国家自然科学基金项目(32260353); 甘肃省重点研发计划(21YF5WA096); 科技部高端外国专家引进计划(G2022042009L); 横向基金项目(GSAU-JSFW-2022-20); 甘肃省自然科学基金项目(1606RJZA077, 1308RJZA262)

作者简介: 杨敏聪(1997-), 男, 广东省深圳市人, 硕士研究生。E-mail: 908468555@qq.com

*通信作者。E-mail: zhangml@gsau.edu.cn

的提取剂、振荡时间不同等均会对结果产生较大差异^[10]。遥感法是利用卫星的遥感模型对草地碳的时空动态进行观测,但遥感法因地形的跌宕起伏影响精度从而影响结果^[11]。模型法在近些年应用的较为广泛,主要的模型有 CENTURY、DNDC、Roth C、Daycent 模型等^[12-14],而 Daycent 模型为典型的生态过程模型,是估算 SOC 大尺度时空变化的推荐方法^[15],可以反映土壤、气候和管理等因素的空间变异性和动态变化情况^[16]。目前 Daycent 模型已成功运用在草地、农田和森林生态系统^[17],包括甘肃、内蒙古等省(区)的草地土壤有机碳变化情况^[17],以及华北、东北等地区主要农作物的温室气体排放研究^[18]。从上述分析可知,Daycent 模型是目前研究天然草地土壤碳储量较为有效的模型,利用 Daycent 模型模拟张掖地区天然草地碳储量变化情况,能够较好的拟合实际情况,对于研究张掖地区天然草地土壤碳汇较为重要。

张掖地区是甘肃省重要的牧区之一,具有丰富的草地资源,其草地状况对甘肃省乃至整个西北地区的环境保护具有重要作用。由于国内外对张掖地区天然草地碳储量的相关研究较少,且随着人类活动和自然条件的不断恶化,大部分地区出现不同程度的草地退化趋势。例如青藏高原、大兴安岭和黄河源区等地区因草地退化、荒漠化加剧^[19-21],草地生态环境受到极大威胁,进一步影响到草地生产力和畜牧业的发展^[22-23]。因此通过对张掖地区天然草地碳储量的研究来预防草地退化刻不容缓。本研究探究了天然草地土壤有机碳总储量和各组分库的储量,并分析天然草地土壤有机碳储量的影响因素和空间变化状况,对张掖地区天然草地生态环境的有效管理和陆地生态系统碳管理策略的完善提供了理论依据^[23]。

1 材料和方法

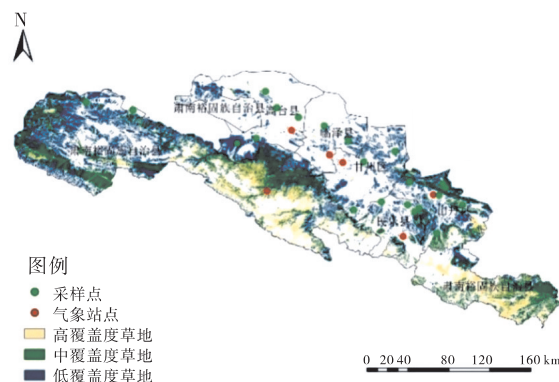
1.1 研究区概况

张掖地处河西走廊中心地带,97°20′~102°12′ E, 37°28′~39°57′ N。南临青藏高原,北靠巴丹吉林沙漠^[24],属于典型的大陆性草原荒漠气候。气候干燥,冬季漫长寒冷,夏季短暂温暖,降水稀少且集中,多风沙。研究区域包含甘州区、临泽县、高台县、山丹县、民乐县、肃南裕固族自治县共5县1区。张掖地区整体面积约为 408.74 hm²,其中草地面积约为 239.07

hm²。祁连山大马营牧场位于张掖地区山丹县城南,是世界上最古老的牧场,也是亚洲最大的牧场^[25]。东西走向的祁连山,不仅是甘肃和青海的界山,也是蕴含甘肃河西丝路谷地湿润气候的天然屏障。张掖地区的气候条件和独特的地理位置,以及丰富的草地、林地、农田资源,使其成为甘肃省草地发展最为丰富的地区之一^[26]。

1.2 数据来源

1.2.1 气象数据 根据张掖地区不同草地类型分布情况和海拔高度等因素,研究选取的采样点分布如图1所示。从中国气象数据网(<http://data.cma.cn/>)下载 1979—2020 年的日平均最高温度、日平均最低温度以及日平均降水量。并提取出各采样站点的日值气象数据。



审图号: GS(2019)3333号

图1 研究区概况和采样点分布图

Fig. 1 Overview of the study area and distribution map of sampling points

1.2.2 实测数据 野外实测数据于 2022 年 6—7 月在张掖 5 县 1 区测量所得,共选取 23 个采样点。在采样过程中,首先对土壤的表层进行清理,去除草地表层土壤中含有的植物根系及石块等,然后用土钻垂直插入清理完的土壤上方,利用自上而下的方式分 3 层进行取样,每个土层采样 3 次。最后将收集到的土壤放入自封袋进行密封保存并贴好相应标签,在实验室中对收集到的张掖地区天然草地土壤进行测算,得到含水率、pH 值、土壤容重和土壤有机碳等数据。

1.2.3 基础数据 从中国生态系统评估与生态安全格局数据库(<http://www.ecosystem.csdb.cn/>)网站下载全国草地覆盖度分布数据,利用 ArcGIS 10.2 提取出张掖地区的草地覆盖度分布图(图1)。本研究所使用的土壤质地类型数据来自于世界土壤数据库

(HWSD),该数据库包含了各个格网点的土壤类型、土壤相位、土壤理化性状等信息,其分辨率约为1 km,运用ArcGIS 10.2提取出模型输入所需要的各类土壤理化性质数据。

1.3 模型介绍

Daycent模型是以“日”为步长的Century模型(即Daily Century,简称Daycent)。在天然草地生态系统土壤有机碳模拟的生物地球化学模型中,Daycent模型是适应性较强的模型。Daycent模型可以有效的模拟土壤中有有机碳的变化情况和N、P、S等养分的循环过程^[27],其主要通过日最高温度、日最低温度和日降水量3个气象因素驱动,结合一系列天然草地管理措施来模拟土壤有机碳的变化状况。在运用Daycent模型的过程中,主要输入的数据为:历史气象数据、土壤质地数据、农作物种植及管理数据等。历史气象数据主要为日最高气温数据、日最低气温数据、平均气温及降水数据等,土壤质地数据主要为土壤pH值、土壤容重、砂粒、粉粒、黏粒,土壤含水量等。Daycent模型通过气象数据驱动和调整相关参数来模拟天然草地碳储量变化情况,也可以较好的模拟地上生物量与天然草地土壤有机碳的循环交互作用。

本研究将收集到的1979—2020年历史气象数据(日最高温数据、日最低温数据、平均气温及降水数据)、土壤质地类型数据(土壤pH值、土壤容重、砂粒、粉粒、黏粒等),整理成对应的天气文件(.wth)与土壤文件(soils.in),运行file100文件,并运用0~30 cm深度的天然草地土壤有机碳野外实测数据对Daycent模型的参数进行校正和本地化。其中参数校正部分引用的是Gurung^[28]在文中使用的马尔科夫链蒙特卡洛方法和后验分布法。

1.4 数据分析方法

本研究运用的软件主要有SPSS 19.0、ArcGIS 10.2、R Studio和Excel 2016等。通过Daycent模型得出草地土壤有机碳储量的模拟值,用Excel 2016对数据进行整理和统计,结合R Studio和SPSS 19.0对草地土壤有机碳的相关性和影响因素进行分析,利用ArcGIS 10.2制作土壤有机碳组的分布图。分析方法有克里金插值法、相关性分析、空间统计法等。

2 结果与分析

2.1 模型模拟结果验证

2.1.1 3层土壤的相关性分析 采用线性回归模型分析0~10、10~20和20~30 cm土层土壤之间的相关性,得到如图2所示的模型验证结果。0~10 cm土壤有机碳密度实测值与10~20 cm土壤有机碳密度实测值之间的可决系数最高,为0.919;0~10 cm土壤有机碳密度实测值和20~30 cm土壤有机碳密度实测值、10~20 cm土壤有机碳密度实测值和20~30 cm土壤有机碳密度实测值的可决系数均在0.8~0.9。3个线性回归模型的P值均小于0.001,表明模型在1%显著性水平下通过显著性检验,3层土壤之间具有较高的相关性,验证了土壤深度与土壤有机碳储量高度相关。

2.1.2 Daycent模型模拟数据的验证 本研究在上述分析的基础上,对Daycent模型的模拟数据与实测数据进行线性回归分析,得到如图3所示的模拟数据与实测数据的线性对比图。并通过克里金插值法对模拟值与实测值在张掖地区草地的分布进行插值,得到图4所示的张掖地区草地土壤有机碳空间分布图。对图4-A和图4-B进行分析可以发现,Daycent模型模拟数据与实测数据在空间分布上存在高度一致性。由图4可知 $R^2=0.979$,Correlation=0.989,表明Daycent模型的参数设置较为合理,且模拟数据与实测数据之间的误差较小,因此用此参数模拟张掖地区天然草地有机碳储量较为合理。

2.1.3 张掖地区天然草地有机碳总量分布情况 图5所示为张掖地区各类天然草地有机碳总量的分布图,是由图1的草地分布图根据草地覆盖程度将草地类型分为高覆盖草地、中覆盖草地和低覆盖草地得出。其中草地覆盖程度大于5%、小于20%为低覆盖草地,大于20%、小于50%为中覆盖草地,大于50%为高覆盖草地。图5数据显示的是张掖地区0~30 cm各类天然草地有机碳储量模拟值和实测值的分布情况,通过分析可得出:高覆盖天然草地的有机碳总量相对于低覆盖天然草地的有机碳总量更低,即天然草地覆盖度越低,土壤有机碳储量越高。

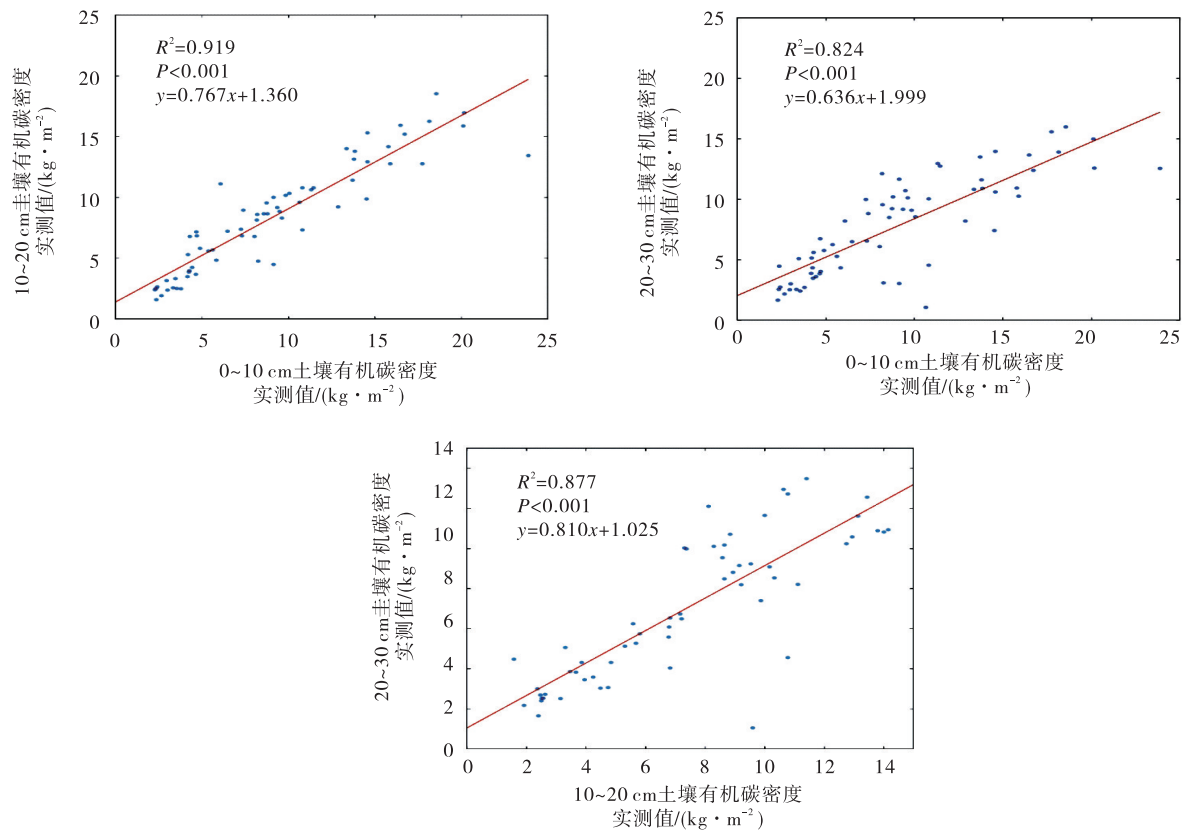


图2 3层土壤之间的相关系数图

Fig. 2 Correlation coefficient diagram between three layers of soil

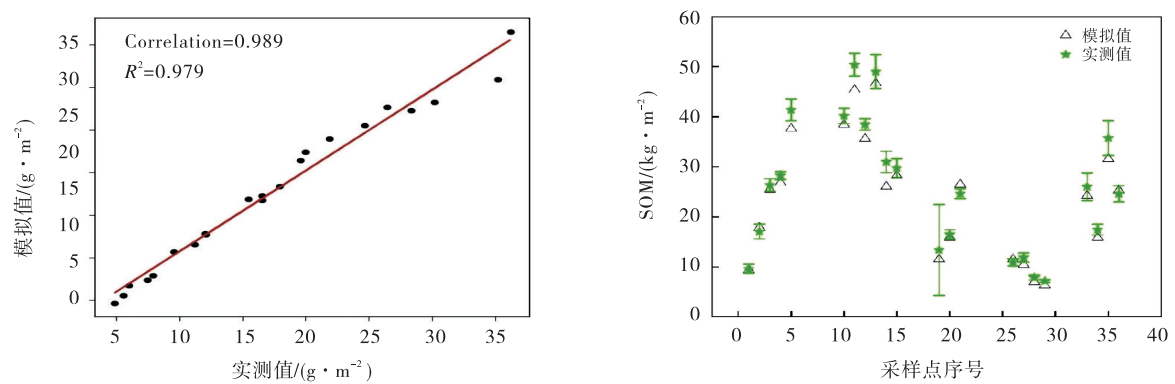
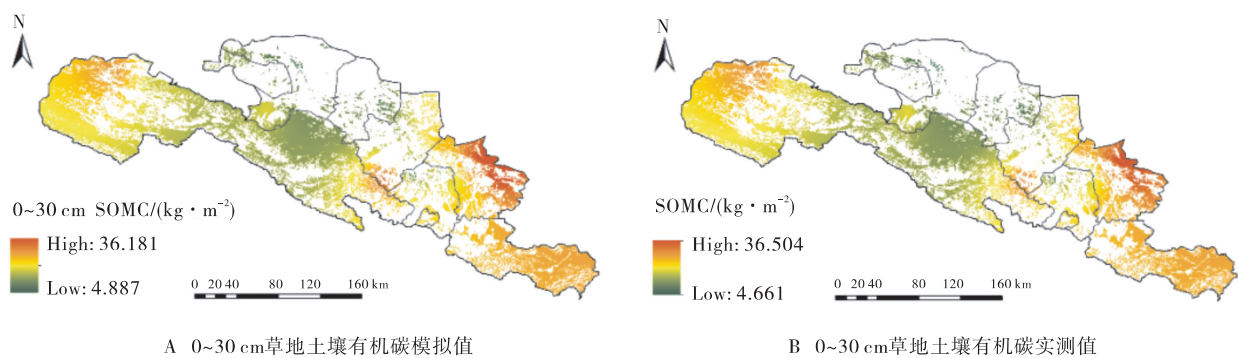


图3 模型模拟数据的验证

Fig. 3 Validation of Model Simulation Data



A 0~30 cm草地土壤有机碳模拟值

B 0~30 cm草地土壤有机碳实测值

图4 0~30 cm草地土壤有机碳模拟数据与实测数据的对比图

Fig. 4 Comparison between simulated and measured organic carbon data of 0~30 cm grassland soil

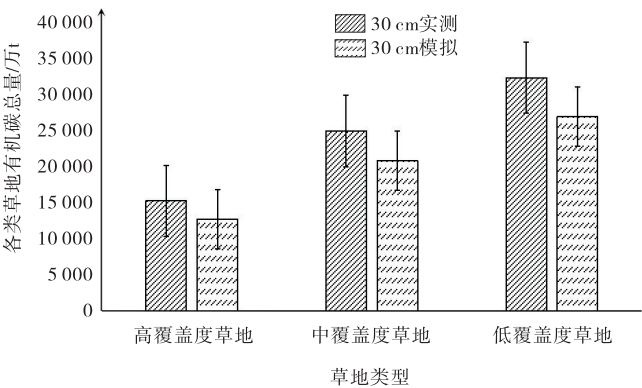


图5 张掖地区各类天然草地有机碳总量分布图

Fig. 5 Distribution of Total Organic Carbon in Various Natural Grasslands in Zhangye Region

2.2 张掖地区天然草地土壤有机碳储量的空间分布格局

将校正好的参数运用在 Daycent 模型中,模拟出各采样点土壤总有机碳储量以及活性、慢性和惰性土壤有机碳储量。为探究各组库对土壤有机碳的影响,本研究对土壤总有机碳储量以及活性、慢性和惰性土壤有机碳储量的相关性进行检验。由土壤总有机碳储量与各组分库碳储量的线性回归模型结果可知,土壤的总有机碳储量与慢性土壤有机碳储量高度相关,模型拟合结果的可决定系数高达 0.998,。而其余组库之间的相关系数均低于 0.5,并无较强的相关性(表 1)。

表 1 土壤总有机碳储量与各组分库的相关性分析结果

Table 1 Correlation analysis results between total soil organic carbon storage and each component pool

Dataset	std	RMSE	RRMSE	R ²	ME
SOM1C—SOM2C	8.388	15.412	1.098	0.434	—12.929
SOM1C—SOM3C	0.349	1.620	0.603	0.214	—1.581
SOM1C—SOMC	8.649	18.862	1.055	0.468	—16.762
SOM2C—SOM3C	8.568	14.219	5.296	0.409	11.348
SOM2C—SOMC	0.463	3.860	0.216	0.998	—3.832
SOM3C—SOMC	8.838	17.566	0.983	0.422	—15.180

注:SOMC、SOM1C、SOM2C、SOM3C 分别代表土壤总有机碳储量、活性、慢性和惰性土壤有机碳储量。

根据张掖地区天然草地土壤有机碳的各组分库和土壤总有机碳储量的模拟值,利用克里金插值法绘制张掖地区土壤有机碳的空间分布图,2022年6月,张掖地区 0~30 cm 天然草地土壤总有机碳储量呈现“东西高,中间低”的空间分布格局,其中张掖地区天然草地土壤总有机碳储量最高的区域主要分布在张掖地区东部的肃南裕固族自治县,最高为 36.504 kg/hm²;其次是民乐县和甘州区;最低是山丹县,为 4.661 kg/hm²(图 6-A)。

活性土壤有机碳储量最高是张掖地区肃南裕固族自治县,为 1.75 kg/hm²;最低是山丹县,为 0.540 kg/hm²;总体呈现“东高西低”的空间分布特点(图 6-B)。慢性土壤有机碳储量则呈现“东西高,中间低”的空间分布特点,与 0~30 cm 天然草地土壤总有机碳储量的空间分布格局图相似(图 6-C);而惰性土壤有机碳储量的空间分布格局与慢性土壤有机碳储量的分布格局相反,呈现“东西低,中间高”的空间分布特点,

其中西部有机碳储量高于东部(图 6-D)。虽然土壤有机碳储量的总量是由各组分库的共同变化引起的,但影响最为显著的是慢性土壤有机碳库的变动,这主要是因为慢性土壤有机碳占总有机碳含量 90% 以上,且活性土壤有机碳与惰性土壤有机碳二者的极差均较小,说明两者的数值都比较稳定,受空间分布与地理位置影响较小。

2.3 张掖地区土壤有机碳储量的影响因素

2.3.1 海拔对土壤有机碳储量的影响 土壤理化性质(土壤含水量、pH、电导率)在不同海拔地区存在一定的差异,由土壤有机碳储量的分布图可知,张掖地区土壤有机碳储量在不同海拔高度上存在差异,但存在高度相关性(图 7)。高海拔地区的土壤有机碳储量较高,在肃南裕固族自治县的西部地区最为显著;而高台县、临泽县、甘州区处于低海拔地区,其土壤有机碳储量很低。从空间角度分析,海拔与土壤有机碳储量分布呈现正相关,是因为海拔高的地区人类活动较

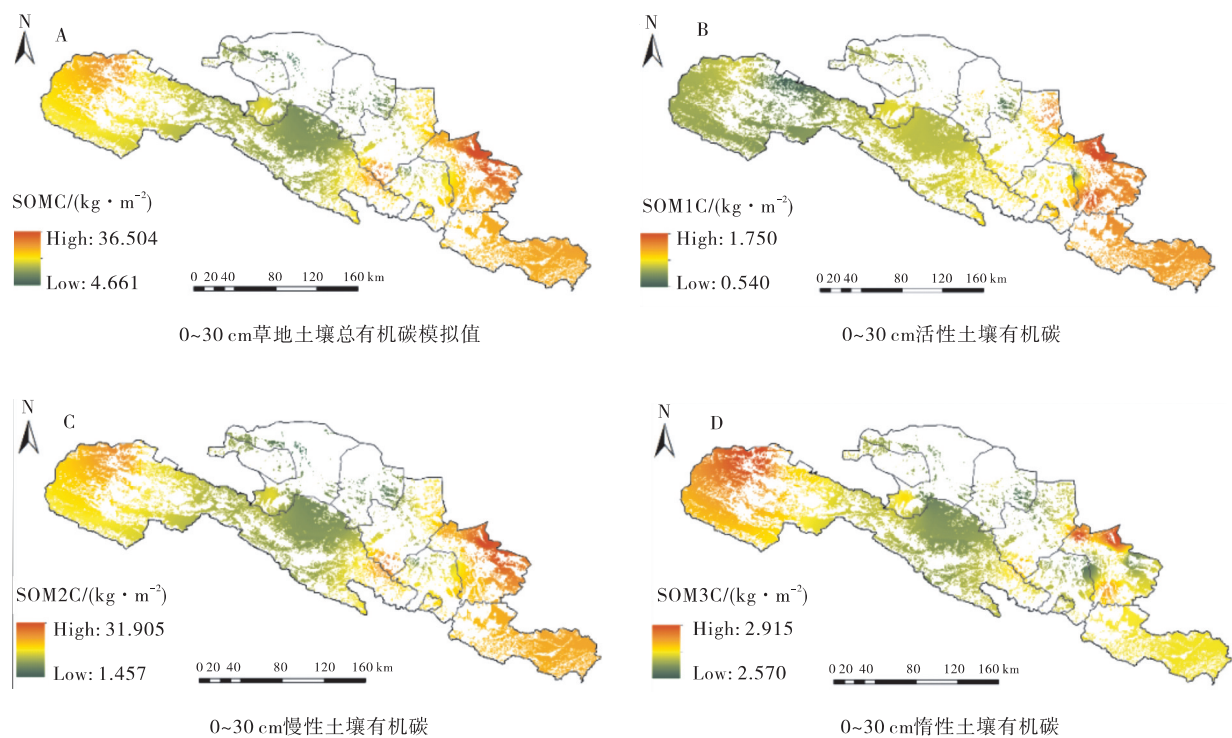


图 6 2022 年 6 月张掖地区土壤有机碳储量、活性、慢性和惰性土壤分布图

Fig. 6 Distribution map of soil organic carbon storage, activity, chronic and inert soils in Zhangye area in June 2022

少,对天然草场的影响就较低,从而使得土壤有机碳含量较高。

2.3.2 土壤理化性质对土壤有机碳储量的影响 对土壤理化性质和土壤有机碳储量进行相关性分析,采

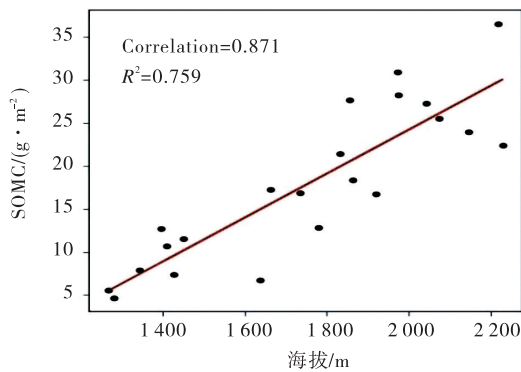


图 7 海拔与土壤有机碳储量的相关性

Fig. 7 Correlation between altitude and soil organic carbon storage

用线性回归模型对土壤的砂砾、粉粒、黏粒和 pH 值等与张掖地区天然草场有机碳储量之间的关系进行线性拟合,发现砂砾、粉粒、黏粒和 pH 值与张掖地区天然草地有机碳储量之间的可决系数值均小于 0.1,表明部分土壤理化性质与张掖地区天然土壤有机碳储量之间的相关性较低;但土壤含水量与土壤有机碳之间的可决系数为 0.535,存在一定的相关性(表 2)。

2.3.3 气候变化对土壤有机碳储量的影响 本研究在实测数值范围内,绘制出张掖地区温度(图 8-A)与降水量(图 8-B)对土壤有机碳储量的影响。将天然草地土壤有机碳模拟值与气温、降水进行线性分析可知:温度与土壤有机碳储量之间呈现负相关,即土壤有机碳储量随张掖地区温度升高而降低;而降水量与土壤有机碳储量之间呈现正相关,即土壤有机碳储量随着张掖地区降水量的增加而升高(图 9)。

表 2 土壤总有机碳储量与土壤理化性质的相关性分析结果

Table 2 Correlation analysis results between total soil organic carbon storage and soil physicochemical properties

相关系数	砂粒	粉粒	粘粒	pH	含水率
SOMC	-0.038	0.105	-0.082	-0.026	0.535

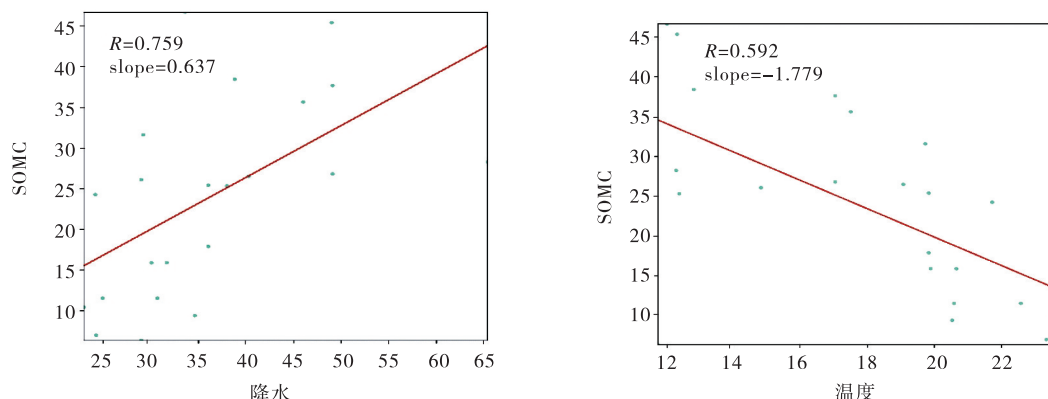


图8 张掖地区气候变化(气温与降水量)对土壤有机碳储量的影响

Fig. 8 The impact of climate change (temperature and precipitation) on soil organic carbon storage in Zhangye region

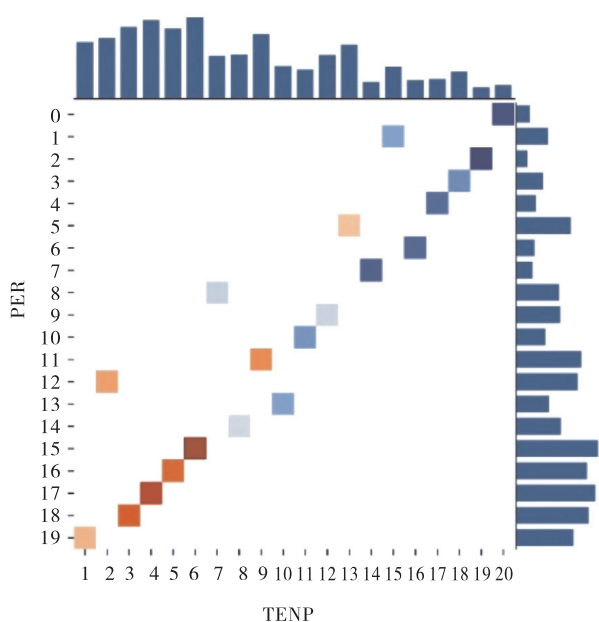


图9 气温与降水量对土壤有机碳储量的相关性分析

Fig. 9 Correlation analysis between temperature and precipitation on soil organic carbon storage)

3 讨论

Daycent模型是基于过程的经验模型,在国内外都被广泛运用于草地、耕地和森林等各种生态系统的研究。本研究通过Daycent模型得出的张掖天然草地土壤有机碳模拟值与实测值具有较高相关性,说明Daycent模型适用于张掖地区天然草地有机碳的模拟分析,也间接说明本研究中Daycent模型的参数校正较为成功。本研究表明草地土壤有机碳的分布具有较高时空变异性,又表明Daycent模型的适应性较强,适用于模拟各类地区。

不同的草地类型对天然草地土壤有机碳储量具有较大的影响,如刘洋在疏勒河流域碳储量的研究中

发现:低覆盖草地土壤有机碳储量最高,其次为中覆盖草地,最低为高覆盖草地^[29],这与本研究的结果一致。但金明珠的研究表明:土壤有机碳含量会随着草地覆盖程度的加深而增加^[30],这与本研究的结果相反。由上述研究可以得出:草地覆盖程度对土壤有机碳储量的影响,会因研究区域的时空差异和土壤理化性质等不同而发生改变。

天然草地土壤有机碳储量的时空变异性主要受气候、地形、生物、土地利用和管理措施等因素的共同影响^[31]。在本研究中,张掖地区天然草地土壤有机碳储量的时空变化情况主要由海拔、土壤属性、气候等多方面因素的共同影响,呈现“东西高,中间低”的空间分布格局。张掖地区天然草地总有机碳储量与慢性土壤有机碳储量的分布情况高度一致,说明两者具有高度相关性。在曹瑞红等^[32]的研究中,慢性土壤有机碳是土壤总有机碳的主要部分,且活性与慢性土壤有机碳的数值较为稳定,这与本研究的结果一致。

陈志林等^[31]的研究表明:随着海拔升高,天然草地土壤有机碳储量呈现先增加后减少的变化趋势。但在本研究中,天然草地土壤有机碳储量的变化在空间上与海拔变化存在高度一致。土壤有机碳储量高的地区(肃南裕固族自治县的西部地区),其海拔也较高;而高台县、临泽县和甘州区处于低海拔地区,其土壤有机碳储量含量也相对较低。这主要是由于高山地区气温较低,雨量充沛^[32-35];而在海拔低的地区,因人口密度高,活动会更加丰富,进而对天然草地产生影响,使得天然草地土壤有机碳储量更低。

杨元合等^[36]认为,土壤有机碳对温度和降水变化的响应是气候变化对陆地生态系统碳循环影响的关

键,气温升高会降低土壤表层有机碳含量,其变化具有一定的季节性^[36]。本研究中温度与草地土壤有机碳含量呈负相关,这与周沛芳等^[37]的研究结论一致,均认为温度较低的地区土壤有机碳储量较高。这主要是由于草地生长和代谢率在低温下较慢,微生物活性不强,导致土壤有机碳储量较高^[38]。而付晨馨等^[39]则认为,降水是影响研究区域土壤有机碳储量的主要因素,且降水量与土壤有机碳储量之间呈现正相关,这与本研究结果一致。Niu等^[40]研究表明:温度和降水主要通过影响土壤的pH值来影响土壤有机碳储量,但由于慢性和惰性土壤的有机碳周转时间相对较长,所以温度和降水对它们的影响具有滞后性。在本研究中,当温度处于小幅度上升状态时,土壤有机碳储量会出现小幅度上升;当温度持续上升时,反而会导致天然草地土壤有机碳储量下降,这也进一步证明土壤有机碳对温度的变化较为敏感。

王冰鑫^[41]的研究表明:在三亚红河地区,土壤有机碳含量与砂粒、粉粒、黏粒并未表现出相关性,而土壤含水量与土壤有机碳含量呈正相关,与本研究结果一致,说明不同的土壤理化性质对土壤有机碳的影响不同。

4 结论

Daycent模型的适用性较强,适用于张掖地区天然草地土壤有机碳储量的模拟分析。在不同的研究区域中,草地的覆盖程度对土壤有机碳储量的影响不同,是由于研究区域的空间格局与土壤理化性质等因素会共同影响着土壤有机碳储量。从张掖地区土壤有机碳储量的空间分布格局来看,张掖地区天然草地土壤总有机碳储量呈现“东西高,中间低”的特点。张掖天然草地土壤总有机碳储量与慢性土壤有机碳储量不仅具有较高相关性,且二者空间分布特点一致;而惰性与活性土壤有机碳储量数值较为稳定,不受海拔和土壤理化性质等影响。

从张掖地区土壤有机碳储量的影响因素来看,海拔和降水与天然草地土壤总有机碳呈正相关;而温度与之呈负相关。在本研究中,砂粒、粉粒、黏粒和pH值等土壤理化性质与天然草地土壤总有机碳储量无明显相关性,但土壤含水率与天然草地土壤总有机碳储量呈现正相关。

参考文献:

- [1] Curlock J M O S, Hall D O. The global carbon sink: a grassland perspective[J]. *Global Change Biology*, 2010, 4(2): 229—233.
- [2] 曲福田,卢娜,冯淑怡. 土地利用变化对碳排放的影响[J]. *中国人口·资源与环境*, 2011, 21(10): 76—83.
- [3] 季波,谢应忠,何建龙,等. 宁夏典型温性天然草地固碳特征[J]. *应用生态学报*, 2020, 31(11): 3657—3664.
- [4] 季波,何建龙,王占军,等. 宁夏天然草地植被碳储量特征及构成[J]. *应用生态学报*, 2021, 32(04): 1259—1268.
- [5] 李学斌,樊瑞霞,刘学东. 中国草地生态系统碳储量及碳过程研究进展[J]. *生态环境学报*, 2014, 23(11): 1845—1851.
- [6] Terra Marcela C N S. The inverted forest: Aboveground and notably large belowground carbon stocks and their drivers in Brazilian savannas[J]. *Science of the Total Environment*, 2023, 867.
- [7] Kononchuk Oleksandret. Evaluation of the impact of varied biochars produced from M. [formula omitted] giganteus waste and application rate on the soil properties and physiological parameters of *Spinacia oleracea* L. [J]. *Environmental Technology & Innovation*, 2022, 28: 78—92.
- [8] 王穗子,樊江文,刘帅. 中国草地碳库估算差异性综合分析[J]. *草地学报*, 2017, 25(5): 905—913.
- [9] 谢立军,白中科,杨博宇,等. 碳中和背景下国内外陆地生态系统碳汇评估方法研究进展[J]. *地学前缘*, 2023, 30(2): 447—462.
- [10] 李太魁,郭战玲,寇长林,等. 提取方法对土壤可溶性有机碳测定结果的影响[J]. *生态环境学报*, 2017, 26(11): 1878—1883.
- [11] 曹霸,凌成星. 基于GF-1遥感数据的若尔盖高寒沼泽湿地地上生物量与土壤有机碳密度估算[J]. *遥感技术与应用*, 2021, 36(1): 229—236.
- [12] 安静,邓波,韩建国,等. 土壤有机碳稳定性研究进展[J]. *草原与草坪*, 2009(2): 82—87.
- [13] 赵雅雯. RothC模型在我国北方农田作物残体提升土壤有机碳中的应用[D]. 北京:中国农业科学院, 2017.
- [14] 孙倩,张美玲,王鑫婧,等. 不同气候情景下甘肃草地碳收支时空模拟与预测[J/OL]. *环境科学*: 1—17[2023-03-16]. <https://doi.org/10.13227/j.hjxx.202210278>.
- [15] Aryal Deb Raj. Silvopastoral systems and remnant forests enhance carbon storage in livestock-dominated landscapes in Mexico[J]. *Scientific Reports*, 2022, 12(1):

- 16769—16769.
- [16] Jeffery Simonet. Biochar application differentially affects soil micro—, meso—macro—fauna and plant productivity within a nature restoration grassland[J]. *Soil Biology and Biochemistry*, 2022, 174: 1325—1339.
- [17] 陈磊, 王金洲, 郝小雨, 等. DayCent 模型模拟黑土长期施肥下土壤碳氮变化[J]. *黑龙江农业科学*, 2021, 328(10): 23—31.
- [18] 高丽, 丁勇. 世界退化草地恢复研究和实践进展[J]. *草业学报*, 2022, 31(10): 189—205.
- [19] 李雪莹, 许娅威, 王峥, 等. 青藏高原 2000—2015 年草地质量的时空变化研究[J]. *北京师范大学学报(自然科学版)*, 2023, 59(1): 147—155.
- [20] 钱芮, 段新宇, 杨海军, 等. 大兴安岭林草交错带草地退化成因分析及其应对策略[J]. *中国科学: 生命科学*, 2022, 52(12): 1883—1896.
- [21] 周万海, 冯瑞章, 满元荣. 黄河源区不同退化程度高寒草地土壤特征研究[J]. *草原与草坪*, 2008(4): 24—28.
- [22] Aryal Deb Raj. Silvopastoral systems and remnant forests enhance carbon storage in livestock—dominated landscapes in Mexico[J]. *Scientific Reports*, 2022, 12(1): 16769—16769.
- [23] 张凯丽, 叶茂, 殷锡凯, 等. 青河林区草地生态系统健康评价[J]. *甘肃农业大学学报*, 2022, 57(2): 182—188.
- [24] 张学斌, 罗君, 石培基, 等. 格网尺度下张掖生态系统服务价值时空演变及地形梯度分异特征[J]. *应用生态学报*, 2020, 31(2): 543—553.
- [25] 张有富, 张爱萍, 李刚, 等. 张掖地区草食畜牧业发展现状及对策研究[J]. *畜牧兽医杂志*, 2016, 35(6): 90—92.
- [26] 汪有奎, 杨全生, 郭生祥, 等. 祁连山北坡森林资源变迁[J]. *干旱区地理*, 2014, 37(5): 966—979.
- [27] 张方方, 岳善超, 李世清. 土壤有机碳组分化学测定方法及碳指数研究进展[J]. *农业环境科学学报*, 2021, 40(2): 252—259.
- [28] Gurung R B, Ogle S M, Breidt F J. Bayesian calibration of the DayCent ecosystem model to simulate soil organic carbon dynamics and reduce model uncertainty[J]. *Geoderma: An International Journal of Soil Science*, 2020: 376.
- [29] 刘洋. 基于 InVEST 模型的疏勒河流域生态系统服务功能时空演变[D]. 兰州: 甘肃农业大学, 2020.
- [30] 金明珠. 三江源区玛多县高寒草地生态系统碳储存功能及价值评估[D]. 兰州: 兰州大学, 2020.
- [32] 曹瑞红, 张美玲, 李晓娟, 等. 甘南高寒草甸土壤有机碳储量时空分布特征的模拟分析[J]. *生态学杂志*, 2022, 41(11): 2145—2153.
- [33] 陈志林, 强浪浪, 向安民, 等. 地形因子对青海祁连圆柏林土壤有机碳空间分布的影响[J]. *西北林学院学报*, 2022, 37(6): 68—74.
- [34] 张影, 谢余初, 齐姗姗, 等. 基于 InVEST 模型的甘肃白龙江流域生态系统碳储量及空间格局特征[J]. *资源科学*, 2016, 38(8): 1585—1593.
- [35] 张金茜, 巩杰, 柳冬青. 甘肃白龙江流域土壤有机碳与全氮储量的空间格局特征[J]. *土壤通报*, 2018, 49(1): 23—30.
- [36] 杨元合, 石岳, 孙文娟, 等. 中国及全球陆地生态系统碳源汇特征及其对碳中和的贡献[J]. *中国科学: 生命科学*, 2022, 52(4): 534—574.
- [37] 周沛芳, 周涛, 刘霞, 等. 青海省土壤有机碳估算及其不确定性分析[J]. *地理科学进展*, 2022, 41(12): 2327—2341.
- [38] 朱婧, 刘鼎, 王珊, 等. 土壤养分及其化学计量特征对微生物碳利用效率的影响机制[J]. *广西师范大学学报(自然科学版)*, 2022, 40(5): 376—387.
- [39] 付晨馨, 种培芳, 周海, 等. 河西走廊绿洲边缘降水对土壤水分特征的影响[J]. *甘肃农业大学学报*, 2023, 58(1): 137—145.
- [40] Niu X Q, Liu C G, Jia X X, *et al.* Changing soil organic carbon with land use and management practices in a thousand—year cultivation region. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 2021, 322: 107639.
- [41] 王冰鑫. 三亚河红树林生态系统群落结构调查及碳储量研究[D]. 三亚: 海南热带海洋学院, 2022.

Study on soil organic carbon storage in natural grasslands of the Zhangye region based on the daycent model

YANY Min-cong¹, XU Yu-juan², ZHANG Mei-ling^{1*}, WANG Xin-jing¹, HUANG Shang-feng², GAO Zhi-wen²

(1. College of Science, Gansu Agricultural University, Quantitative Biology Research Center, Lanzhou 730070, China; 2. Environmental Protection Bridge (Shanghai) Environmental Technology Co., Ltd, Shanghai 200120, China)

Abstract: **【Objective】** This study aimed to localize the parameters of the Daycent model to simulate soil organic carbon stock in natural grassland in Zhangye area. The goal was to investigate the spatial distribution and influencing factors of SOC stock in this region. **【Method】** The Daycent model, a daily time—step version of the CENTURY model, was used to simulate the spatial distribution of soil organic carbon storage in natural grasslands in Zhangye area from 1979 to 2020. The simulation was based on daily value meteorological data from local weather stations, soil data and field measurements taken in June and July 2022. The localized model was used to analyze the influencing factors. **【Result】** The spatial distribution of soil organic carbon stock followed a pattern of "high in the east and west, low in the middle", with the trends in total soil organic carbon stock and chronic soil organic carbon stock being similar. In June 2022, the highest soil organic carbon was observed in Su 'nan Yugur autonomous county, at 36.181 kg/m², while the lowest was in Shandan County, at 4.661 kg/m². Elevation was found to align with the distribution of soil organic carbon stocks in natural grasslands, while correlations between soil physicochemical properties and soil organic carbon stocks were generally low. Positive correlations were found between precipitation and soil organic carbon, whereas temperature had a negative correlation with soil organic carbon. **【Conclusion】** The Daycent model effectively simulated soil organic carbon stock in Zhangye's natural grasslands and demonstrated high adaptability. Soil organic carbon in Zhangye is influenced by various factors, with the chronic soil organic carbon pool having the greatest impact. Understanding the distribution of soil organic carbon can inform future management practices for natural grassland carbon sinks in Zhangye.

Key words: Zhangye district; soil organic carbon; storage; daycent model; space distribution

(责任编辑 靳奇峰)